



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

储能原理与技术

Principles and Technology for Energy Storage

主 编 黄志高

副主编 林应斌 李传常



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

储能原理与技术

Principles and Technology for Energy Storage

主 编 黄志高

副主编 林应斌 李传常



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是全国高等院校新能源专业系列规划教材之一，它系统而全面地介绍了储能原理与技术的基础知识、基本工艺和一些应用实例。本书共分8章，重点介绍能量转换和储存与利用，储热原理与技术，相变储热技术与材料，铅酸电池、镍基二次碱性电池、锂离子电池等三类重要储能电池的发展历史、工作原理、基本特点、分类、组成材料、设计与制造、测试技术、安全性等，同时还简单介绍了抽水蓄能技术、超导储能技术、压缩空气储能技术、金属-空气电池、超级电容器等，最后介绍了储能控制技术。

本书适合作为高等学校新能源科学与工程专业及其他相关专业的教学参考用书，也适合从事新能源储能、动力电池生产与设计的工程技术人员借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

储能原理与技术 / 黄志高主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2018.6
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6542-5

I. ①储… II. ①黄… III. ①储能—技术—高等学校—教材 IV. ①TK02

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第130132号

书 名	全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 储能原理与技术 CHUNENG YUANLI YU JISHU
作 者	主编 黄志高 副主编 林应斌 李传常
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.25印张 456千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

- 顾问** 褚君浩 (中国科学院上海技术物理研究所)
徐建中 (中国科学院工程热物理研究所)
贺德馨 (中国风能协会)
刘吉臻 (华北电力大学)
杨德仁 (浙江大学)
张百良 (河南农业大学)
- 主任** 杨勇平 (华北电力大学)
- 副主任** 戴松元 (华北电力大学)
陈汉平 (华中科技大学)
黄志高 (福建师范大学)
汪建文 (内蒙古工业大学)
- 委员** (按姓氏笔画排序)
王 谦 (江苏大学)
王少清 (济南大学)
王景甫 (北京工业大学)
田 德 (华北电力大学)
邢作霞 (沈阳工业大学)
许 昌 (河海大学)
孙后环 (南京工业大学)
李 岩 (东北农业大学)
李 涛 (青海师范大学)
杨 晨 (重庆大学)
杨世关 (华北电力大学)
陈 荐 (长沙理工大学)
林 鹿 (厦门大学)
周建斌 (南京林业大学)
周继承 (中南大学)
钱 斌 (常熟理工学院)

丛书前言

总算不负大家几年来的辛苦付出，终于到了该为这套教材写篇短序的时候了。

这套全国高等院校新能源专业规划教材、全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材建设的缘起，要追溯到2009年我国启动的国家战略性新兴产业发展计划，当时国家提出了要大力发展包括新能源在内的七大战略性新兴产业。经过不到十年的发展，我国新能源产业实现了重大跨越，成为全球新能源产业的领跑者。2016年国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出要把战略性新兴产业摆在经济社会发展更加突出的位置，强调要大幅提升新能源的应用比例，推动新能源成为支柱产业。

产业的飞速发展导致人才需求量的急剧增加。根据联合国环境规划署2008年发布的《绿色工作：在低碳、可持续发展的世界实现体面劳动》，2006年全球新能源产业提供的工作岗位超过230万个，而根据国际可再生能源署发布的报告，2017年仅我国可再生能源产业提供的就业岗位就达到了388万个。

为配合国家战略，2010年教育部首次在高校设置国家战略性新兴产业相关专业，并批准华北电力大学、华中科技大学和中南大学等11所高校开设“新能源科学与工程”专业，截至2017年，全国开设该专业的高校已超过100所。

上述背景决定了新能源专业的建设无法复制传统的专业建设模式，在专业建设初期，面临着既缺乏参照又缺少支撑的局面。面对这种挑战，2013年华北电力大学力邀多所开设该专业的高校，召开了一次专业建设研讨会，共商如何推进专业建设。以此次会议为契机，40余所高校联合成立了“全国新能源科学与工程专业联盟”（简称联盟），联盟成立后发展迅速，目前已有近百所高校加入。

联盟成立后将教材建设列为头等大事，2015年联盟在华北电力大学召开了首次教材建设研讨会。会议确定了教材建设总的指导思想：全面贯彻党的教育方针和科教兴国战略，广泛吸收新能源科学研究和教学改革最新成果，认真对标中国工程教育专业认证标准，使人才培养更好地适应国家战略性新兴产业的发展需要。同时，提出了“专业共性课十方向特色课”的新能源专业课程体系建设思路，并由此确定了教材建设两步走的计划：第一步以建设新能源各个专业方向通用的共性课程教材为核心；第二步以建设专业方向特色课程教材为重点。此次会议还确定了第一批拟建设的教材及主编。同时，通过专家投票的方式，选定中国水利水电出版社作为教材建设的合作出版机构。在这次会议的基础上，联盟又于2016年在北京工业大学召开了教材建设推进会，讨论和审定了各部教材的编写大纲，确定了编写任务分工，由此教材正式进入编写阶段。

按照上述指导思想和建设思路，首批组织出版9部教材：面向大一学生编写了《新能源科学与工程专业导论》，以帮助学生建立对专业的整体认知，并激发他们的专业学习兴

趣；围绕太阳能、风能和生物质能3大新能源产业，以能量转换为核心，分别编写了《太阳能转换原理与技术》《风能转换原理与技术》《生物质能转化原理与技术》；鉴于储能技术在新能源发展过程中的重要作用，编写了《储能原理与技术》；按照工程专业认证标准对本科毕业生提出的“理解并掌握工程管理原理与经济决策方法”以及“能够理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响”两项要求，分别编写了《新能源技术经济学》《能源与环境》；根据实践能力培养需要，编写了《光伏发电实验实训教程》《智能微电网技术与实验系统》。

首批9部教材的出版，只是这套系列教材建设迈出的第一步。在教育信息化和“新工科”建设背景下，教材建设必须突破单纯依赖纸媒教材的局面，所以，联盟将在这套纸媒教材建设的基础上，充分利用互联网，继续实施数字化教学资源建设，并为此搭建了两个数字教学资源平台：新能源教学资源网（<http://www.creeu.org>）和新能源发电内容服务平台（<http://www.yn931.com>）。

在我国高等教育进入新时代的大背景下，联盟将紧跟国家能源战略需求，坚持立德树人的根本使命，继续探索多学科交叉融合支撑教材建设的途径，力争打造出精品教材，为创造有利于新能源卓越人才成长的环境、更好地培养高素质的新能源专业人才奠定更加坚实的基础。有鉴于此，新能源专业教材建设永远在路上！

丛书编委会

2018年1月

本书前言

随着全球性能源短缺、环境污染等问题的日益突出，新能源，特别是太阳能转换、存储和利用，备受关注和青睐。为加快推进我国新能源发展，2016年，国务院发布了《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，把新能源、新材料和新能源汽车列入八大战略性新兴产业之中。提出把握全球能源变革发展趋势和我国产业绿色转型发展要求，大幅提升新能源汽车和新能源的应用比例，全面推进高效节能、先进环保和资源循环利用产业体系建设，推动新能源汽车、新能源和节能环保等绿色低碳产业成为支柱产业。能源存储是新能源和新能源汽车产业中的重要组成部分，对产业发展具有举足轻重的作用。太阳能和风能发电都需要建立配套的储能系统，新能源汽车更离不开高性能的储能系统。2010年，教育部为适应新能源、新材料和新能源汽车等战略性新兴产业的需求开设了新能源工科相关专业，在这些专业中开设《储能原理与技术》是非常必要的。

本书系统而全面地介绍了储能原理与技术的基础知识、基本工艺和一些应用实例，共分为8章，第1章绪论，重点简要介绍能量转换和储存与利用、化学储能、相变储能及新能源技术中的储能技术；第2章储热原理与技术，重点介绍储热资源、储热技术发展与应用、储热基本原理与概念、储热基本方式与材料、储热技术评价依据与经济性、储热技术应用与新进展等；第3章相变储热技术与材料，重点介绍相变储热材料与相变储热技术的发展现状、相变储热技术、相变储热材料、储热换热装置和系统设计基础、相变储热技术的工程应用；第4章铅酸蓄电池，重点介绍铅酸蓄电池的发展历史、基本概念、工作原理、特点、分类、电池材料、设计与制造、测试技术及其应用；第5章镍基二次碱性电池，重点介绍镍镉电池和镍氢电池概况、工作原理、型号和特点、设计与制造、性能与保养及其应用；第6章锂离子电池，重点介绍锂离子电池的发展历史、工作原理、基本概念、特点、分类、电池材料、设计与制造、测试技术、安全性等；第7章其他类型储能材料与技术，重点介绍抽水蓄能技术、超导储能技术、压缩空气储能技术、金属—空气电池、超级电容器等；第8章储能控制技术，重点介绍锂离子电池管理系统、光伏发电系统储能控制技术等。

本书力求做到概念清晰，语言叙述通俗易懂，理论分析严谨，结构编排由浅入深，在分析问题时注重启发性，以有说服力的工程实例为依据，较全面系统地阐述储能技术的基本理论、方法与工艺等，最后配以习题，希望能做到理论联系实际。

本书由黄志高任主编，林应斌和李传常任副主编。第1章由黄志高、李传常编写，第2章由李传常编写，第3章由刘春慧编写，第4章由程桂石编写，第5章由洪振生编写，第6章由林应斌、陈敬波编写，第7章由林应斌、徐芹芹编写，第8章由卢宇、俞峰编写。最后由黄志高、林应斌和李传常统稿。

本书在编写过程中参阅了许多作者的有关著作、教材、论文和资料，以及新能源公司

的实际设计和运行数据。同时，得到了国家级和省级实验教学示范中心的经费支持；得到了中国水利水电出版社李莉、殷海军、王惠等的鼎力支持；得到了全国新能源科学与工程专业联盟理事长戴松元、秘书长杨世关等的大力支持；得到了梁光胜、钱斌、李加新在初稿审阅工作上的全力支持。在本教材付梓之际，在此致以深深的谢意！

由于编者水平有限、经验不足，加上时间仓促，书中定有许多不妥之处，敬请读者批评指正。

黄志高

2018年6月于福州

目 录

丛书前言

本书前言

第1章 绪论	1
1.1 能量转换、储存与利用	1
1.2 化学储能	8
1.3 相变储热	14
1.4 新能源技术中的储能技术	17
习题	23
参考文献	23
第2章 储热原理与技术	25
2.1 热能资源	25
2.2 储热技术发展与应用	29
2.3 储热基本原理与概念	35
2.4 储热基本方式与材料	46
2.5 储热技术评价依据与经济性	58
2.6 储热技术应用与新进展	63
习题	66
参考文献	67
第3章 相变储热技术与材料	70
3.1 相变储热材料与相变储热技术的发展现状	70
3.2 相变储热技术	71
3.3 相变储热材料	74
3.4 储热换热装置和系统设计基础	84
3.5 相变储热技术的工程应用	90
习题	93
参考文献	94
第4章 铅酸蓄电池	96
4.1 铅酸蓄电池的发展历史	96
4.2 铅酸蓄电池的基本概念	97
4.3 铅酸蓄电池的工作原理	99

4.4	铅酸蓄电池的特点	102
4.5	铅酸蓄电池的分类	102
4.6	铅酸蓄电池的材料	106
4.7	铅酸蓄电池的设计与制造	108
4.8	铅酸蓄电池的测试技术	114
4.9	铅酸蓄电池的应用	116
	习题	118
	参考文献	119
第5章	镍基二次碱性电池	120
5.1	镍镉电池	120
5.2	镍氢电池	129
	习题	142
	参考文献	143
第6章	锂离子电池	144
6.1	锂离子电池的发展历史	144
6.2	锂离子电池的工作原理	145
6.3	锂离子电池的基本概念	147
6.4	锂离子电池的特点	153
6.5	锂离子电池的分类	154
6.6	锂离子电池材料	156
6.7	锂离子电池的设计与制造	172
6.8	锂离子电池的测试技术	190
6.9	锂离子电池的安全性	207
	习题	212
	参考文献	213
第7章	其他类型储能材料与技术	215
7.1	抽水蓄能技术	215
7.2	超导储能技术	219
7.3	压缩空气储能技术	222
7.4	金属-空气电池	226
7.5	超级电容器	242
	习题	250
	参考文献	251
第8章	储能控制技术	254
8.1	锂离子电池管理系统	254
8.2	光伏发电系统储能控制技术	270
	习题	296
	参考文献	298

第 1 章 绪论

本章简要介绍了各种能源的产生、转换、储能及其应用，分析储能技术在新能源科学与工程中的重要性。重点介绍了包括机械储能、电磁储能、化学储能和相变储能各种储能技术的性能、主要特点和研究应用现状，尤其是化学储能和相变储能。最后，介绍了储能技术在新能源技术的应用，给出了几个应用实例。

1.1 能量转换、储存与利用

1.1.1 太阳能、风能与储能技术

太阳能是指太阳的热辐射能，太阳每秒钟照射到地球的能量为 49.94 亿 J，相当于 500 万 t 标准煤燃烧所产生的能量。太阳能的利用有光热转换和光电转换两种方式。

太阳能的主要优点有：①太阳光普照大地，处处皆有，可直接开发和利用，便于采集；②清洁无害，开发利用太阳能不会污染环境，是最清洁能源之一；③取之不尽，用之不竭，是现今世界上可以开发的最丰富的可再生能源，且能量巨大，每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 160 万亿 t 标准煤。太阳能的主要缺点有：①分散性，到达地球表面的太阳辐射能的总量尽管很大，但是能流密度很低，因此，在利用太阳能时，想要得到一定的转换功率，往往需要光热转换和光电转换器件和设备；②不稳定性，由于受到昼夜、季节以及地理纬度、海拔等自然条件的限制，还有晴、阴、云、雨等随机因素的影响，到达某一地面的太阳辐照度既是间断的、又是极不稳定的，这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源，从而最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源，就必须很好地解决储能问题，即把晴朗白天的太阳辐射能尽量储存起来，以供夜间或阴雨天使用。因此，储能技术成为太阳能利用的重要组成部分。

光伏太阳能发电示意如图 1.1 所示。

风能是空气流具有的动能，空气流做功而提供给人类可利用的能量，属于可再生能源。空气流速度越高，风能越大。风能通过传动发电。尽管风能丰富且广泛分布，但它具有典型的随机性和间歇性。大规模风电并网将给电力系统带来一系列挑战。风电并网造成的主要影响有：①风电的随机波动性使得风电成为扰动源，对电力系统的稳定运行构成威胁；②电网故障时，风电机组受低电压穿越能力限制将自动脱网，导致电网运行状况恶

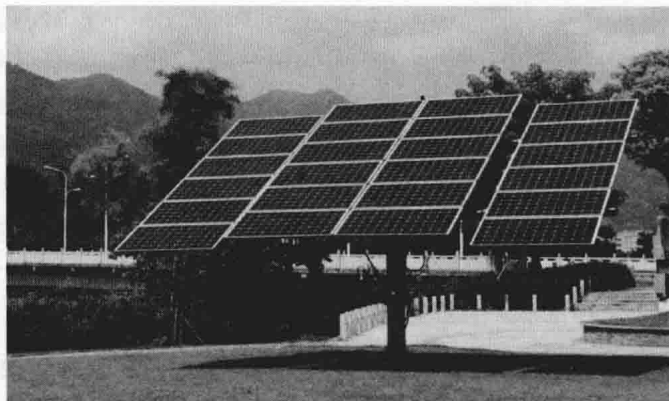


图 1.1 光伏太阳能发电

化；③由于电网承受扰动的能力有限，超过电网容纳能力的风电将难以消纳；④风电的波动性还会造成系统接入点的电压波动，带来闪变等电能质量问题；⑤作为电源，风电接入电网将影响原有电力系统的运行方式，增加系统备用容量的需求，对系统运行的经济性产生影响。因此，发展储能技术是提高风电质量的有效途径。

风能发电示意如图 1.2 所示。



图 1.2 风能发电

储能技术由一系列设备、器件和控制系统等组成，以实现电能或热能的存储和释放。储能就像水库，多雨时把水蓄起来，干旱时把水放出来发电或灌溉等。在新能源科学与技术应用中，储能系统具有动态吸收能量并适时释放的特点，能有效弥补太阳能、风能的间歇性、波动性的缺点，改善太阳能发电场和风电场输出功率的可控性，提升输出电能的稳定水平，从而提高发电的质量。储能技术对于全球节能减排与优化能源结构的目标实现有着积极的推动作用，是智能电网、可再生能源接入、分布式发电、微网系统及电动汽车发展必不可少的支撑技术之一。尤其对于电力系统，储能技术应用贯穿于发电、输电、供电、配电、用电等各个环节。它不但可以有效地实现需求侧管理、消除峰谷差、平滑负荷，而且可以提高电力设备的运行效率、降低供电成本，最终提高电能质量和用电效率，



保障电网优质、安全、可靠供电和高效用电的需求，促进电网的结构形态、规划设计、调度管理、运行控制与使用方式等的优化与改善。

储能系统示意如图 1.3 所示。

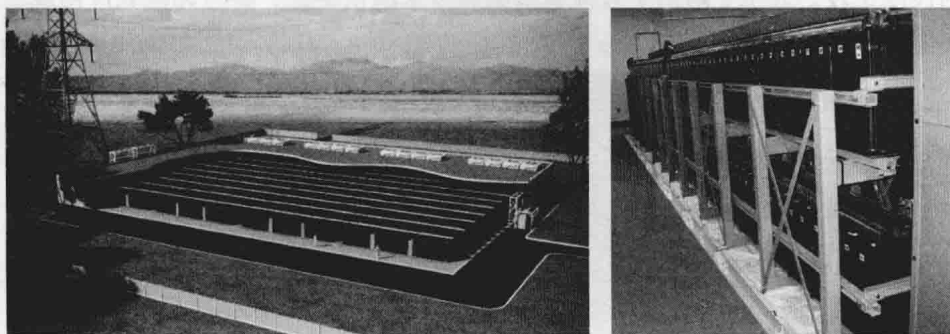


图 1.3 储能系统

1.1.2 储能技术的分类与应用

图 1.4 涵盖了各种能量产生、储存和应用的形式。根据能量来源的不同，可以将能量产生分为 8 大类，即太阳能、风能、生物质能、核能、热能、机械能、化学能和电磁能等。根据能量转换（化）形式的不同，可以将储能技术分为机械储能、电磁储能、化学储能和相变储能等 4 大类，其中：①机械储能的典型特征是将电能转换为机械能进行储存，常见的储能方式有抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等 3 种；②电磁储能的典型特征是将电能转换为电磁能进行储存，常见的储能方式有超导储能；③化学储能的典型特征是将电能转换为化学能进行储存，常见的储能方式有铅酸蓄电池、锂离子电池、碱性电池（镍镉电池、镍氢电池等）、金属-空气电池、超级电容器储能、钠硫电池和液流电池等 7 种；④相变储能的典型特征是将能量转换为热能进行储存，即相变储热，常见的储能方式有显热储热、潜热储热和化学能储热 3 种。

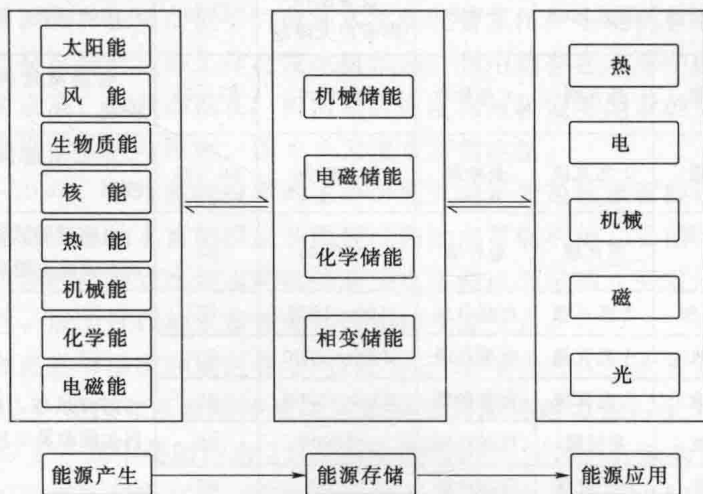


图 1.4 各种能量的产生、储存和应用

图 1.5 给出了不同储能方式的功率等级和放电时间，可以看到，不同储能方式的储能功率及其对应的放电时间不同，根据这一特点，基于不同的需求，如削峰填谷、调峰调频、稳定控制、改善电能质量乃至紧急备用电源等，应选择不同的储能方式。表 1.1 给出了不同储能技术的性能比较。表 1.2 给出了各种典型储能技术的主要优、缺点和研究应用现状。

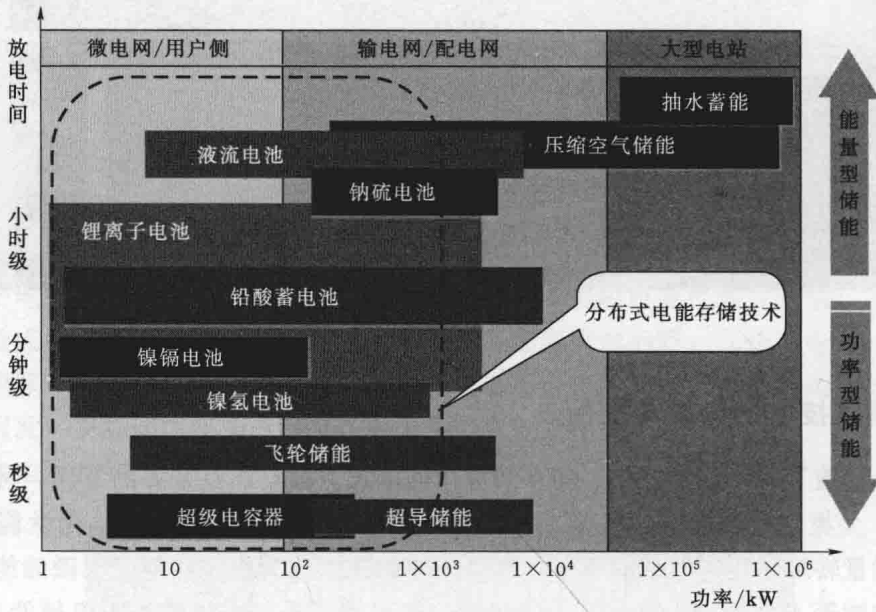


图 1.5 不同储能方式的功率等级和放电时间

表 1.1 不同储能技术的性能比较

储能技术类型		功率规模	全功率响应时间	循环寿命/次	循环效率/%	应用模式
机械储能	抽水蓄能	吉瓦级	分钟级	设备使用期限内无限制	70~85	削峰填谷、频率调节、系统备用
	压缩空气储能	百兆瓦级	分钟级	设备使用期限内无限制	≥70	削峰填谷、频率调节、系统备用
	飞轮储能	兆瓦级	十毫秒级	≥20000	85~90	电能质量调节和电力系统稳定控制
电磁储能	超导储能	十兆瓦级	毫秒级	≥100000	90~95	电能质量调节和电力系统稳定控制
化学储能	超级电容器储能	兆瓦级	毫秒级	≥50000	95	电容储能式硅整流分合闸装置大功率直流电机启动支撑
	铅酸蓄电池	十兆瓦级	百毫秒级	500~1200	75	削峰填谷、频率和电压调节、可再生能源灵活接入、系统备用
	镍镉电池	十兆瓦级	百毫秒级	2000~2500	80	
	钠硫电池	十兆瓦级	百毫秒级	2500~4500	85	
	液流电池	兆瓦级	百毫秒级	≥12000	80	
	镍氢电池	百千瓦级	百毫秒级	≥2500	85	
锂离子电池	兆瓦级	百毫秒级	1000~10000	90		



表 1.2 各种典型储能技术的主要优、缺点和研究应用现状

储能技术类型		主要优点	主要缺点	作用	国内研究应用现状
机械 储能	抽水蓄能	大容量、低成本	安装位置有特殊要求	调峰调频、系统备用	已建 22 座、最大 2400MW
	压缩空气储能	大容量、低成本、寿命长	对位置有特殊要求、需气体燃料	削峰填谷、频率控制	研究较少、应用少
	飞轮储能	比功率高	低能量密度、噪声大	调频、改善电能质量	实验室研究阶段
电磁 储能	超导储能	比功率高、响应快	能量密度较低、成本高	抑制振荡、LVRT	已有 35kJ 低温超导样机
化学 储能	超级电容器储能	响应快、效率高	低能量密度	稳定控制、FACTS	小规模应用示范
	铅酸蓄电池	低成本	深度充放电时寿命较短	抑制功率波动、黑启动	技术成熟、示范工程最大 40MW，现在少用
	锂离子电池	高功率、高能量密度、高效率	生产成本低、需特殊的充电电路	改善电能质量、备用电源	技术成熟、已建几十兆瓦级示范工程
	镍镉电池	比能量较高、寿命较长	比功率较低、重金属污染	改善电能质量、备用电源	技术成熟、示范工程少
	镍氢电池	比能量较高、寿命较长、安全性较好	生产成本低、高温性能差、需要控制氢损失	改善电能质量、备用电源	技术成熟、示范工程少
	液流电池	大容量、功率和能量相互独立	能量密度比较低	负荷跟踪、抑制功率波动	几个兆瓦级风储示范工程
	钠硫电池	高功率、高能量密度、高效率	生产成本、安全性问题	旋转备用、抑制功率波动	已建几十兆瓦级示范工程

1.1.2.1 机械储能

1. 抽水蓄能

抽水蓄能是目前电力系统中应用最为广泛、寿命周期最长（40~60 年）、循环次数最多（10000~30000 次）、容量最大（500~8000MW·h）的一种成熟的储能方式，主要用于系统备用和调峰调频。在负荷低谷时段抽水蓄能设备工作在电动机状态，将水抽到上游水库保存；而在负荷高峰时设备工作在发电机状态，利用储存在水库中的水发电。但抽水蓄能受建站选址要求高、建设周期长、机组响应速度相对较慢等因素的影响，其大规模推广应用受到一定程度的约束与限制。图 1.6 为抽水蓄能电站。

在未来的 5~10 年，抽水蓄能技术的主要研究方向是变速抽水蓄能机组。变速抽水蓄能机组分为交流励磁变速抽水蓄能机组和阀控变频抽水蓄能机组。目前，有人提出了将泵和水轮机合并为一体的可逆式水泵水轮机的新抽水蓄能机组结构，有效地提高了抽水蓄能电站建设的经济性，成为现代抽水蓄能电站应用的主要形式。

日本、美国和西欧等国家和地区在 20 世纪 60—70 年代进入抽水蓄能电站建设的高峰期。到 2010 年为止，美国和西欧经济发达国家抽水蓄能机组容量占世界抽水蓄能电站总装机容量的 55% 以上，其中美国约占 3%，日本则超过了 10%^[6]。未来抽水蓄能电站的重点将着眼于运行的可靠性和稳定性，在水头变幅不大和供电质量要求较高的情况下使用连续调速机组，实现自动频率控制。

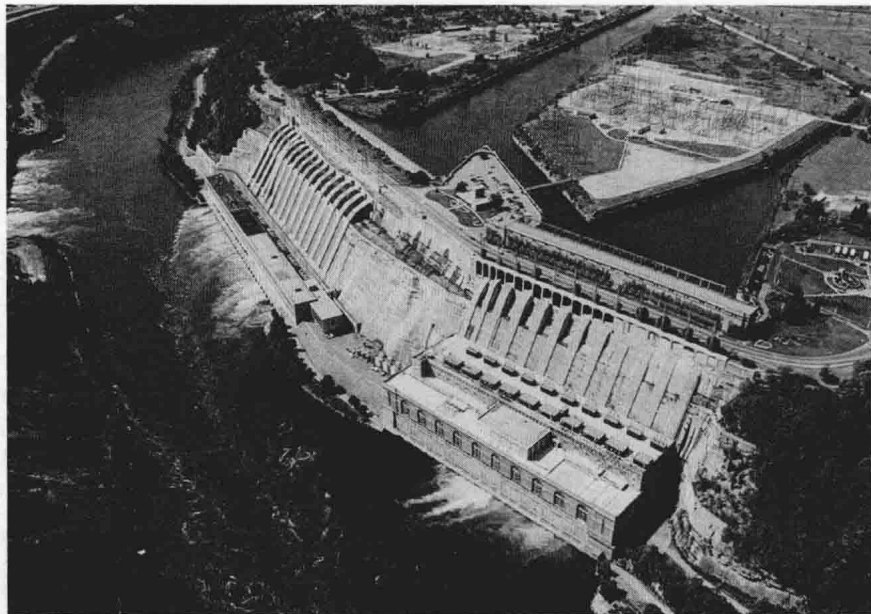


图 1.6 抽水储能电站 (Niagara Falls, Canada)

2. 压缩空气储能

压缩空气储能电站是一种调峰用燃气轮机发电厂，主要利用电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气，并将其储藏在典型压力为 7.5MPa 的高压密封设施内，在用电高峰释放出来驱动燃气轮机发电。压缩空气储能电站建设投资和发电成本均低于抽水蓄能电站，但其能量密度低，建设受地形制约，对地质结构有特殊要求。

压缩空气储能成本较低，并且具有安全系数高、寿命长 (20~40 年)、响应速度快等特性。但其储能密度低、依赖大型储气洞穴并产生化石燃料燃烧污染是其主要的制约因素。目前，针对这些问题，压缩空气储能的发展方向是积极开展新型压缩空气储能系统的研发，如等温压缩空气储能系统、地面压缩空气储能系统、液态空气储能系统、先进的绝热压缩空气储能系统以及空气蒸汽联合循环压缩空气储能系统等。

世界上第一座商业运行的压缩空气储能电站是 1978 年投入运行的德国 Huntorf 电站，目前仍在运行中。机组的压缩机功率为 60MW，释能输出功率为 290MW，系统将压缩空气存储在地下 600m 的废弃矿洞中。机组可连续充气 8h，连续发电 2h。1991 年投入商业运行的美国亚拉巴马州 McIntosh 压缩空气储能电站，其地下储气洞穴在地下 450m，压缩机功率为 50MW，发电功率为 110MW，可以实现连续 41h 空气压缩和 26h 发电。另外日本、意大利、以色列等国也正在建设压缩空气储能电站。我国对压缩空气储能系统的研发起步较晚，但该研究领域正逐渐受到相关科研院所、电力企业和政府部门的重视。

3. 飞轮储能

飞轮储能系统由高速飞轮、轴承支撑系统、电动机/发电机、功率变换器、电子控制系统和真空泵、紧急备用轴承等附加设备组成。谷值负荷时，飞轮储能系统由工频电网提供电能，带动飞轮高速旋转，以动能的形式储存能量，完成电能到机械能的转换过程；出现峰值负荷时，高速旋转的飞轮作为原动机拖动电机发电，经功率变换器输出电流和电



压,完成机械能到电能的转换过程。飞轮储能功率密度大于 5kW/kg , 能量密度超过 $20\text{W}\cdot\text{h/kg}$, 效率在 90% 以上, 循环使用寿命长达 20 年, 工作温区为 $-40\sim 50^\circ\text{C}$, 无污染, 维护简单, 可连续工作, 积木式组合后可以实现兆瓦级, 主要用于不间断电源 (UPS)/应急电源 (EPS)、电网调峰和频率控制。飞轮储能如图 1.7 所示。

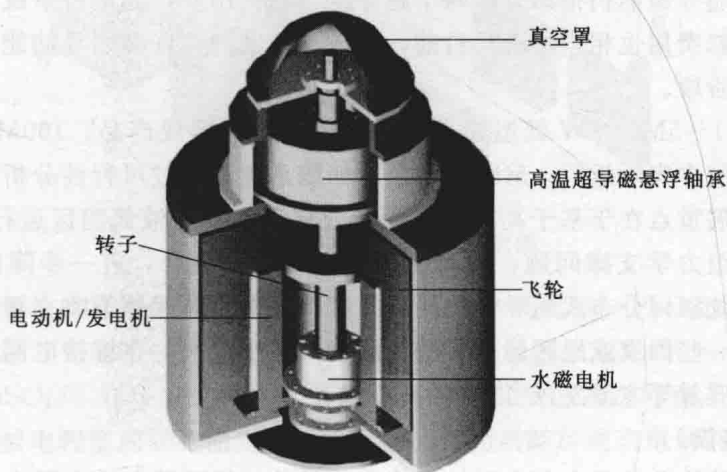


图 1.7 飞轮储能

飞轮储能关键技术包括: ①安全可靠并可支持高速运行的轴承; ②可以承受高速旋转重力的转子设计与材质。飞轮储能的储能容量、自放电率等方面是制约飞轮储能系统发展的重要因素。随着日渐成熟的超导磁悬浮技术和单体并联技术, 飞轮储能将逐渐克服现有的能量密度低、自放电率高等缺点, 其应用领域将逐步扩展到大型新能源电力系统的储能领域。

国外飞轮储能系统已形成系列商业化产品, 如 Active Power 公司的 500kW Clean Source DC 和 Beacon Power 公司生产的由 10 个 $25\text{kW}\cdot\text{h}$ 单元组成的 Smart Energy Matrix 储能系统等。目前, 飞轮储能装置已投入电网实际运行, 如纽约电力管理局就通过试验安装 $1\text{MW}/(5\text{kW}\cdot\text{h})$ 的飞轮储能装置来解决电动机引起的电压突变。飞轮储能具有良好的负荷跟踪和快速响应性能, 可用于容量小、放电时间短, 但瞬时功率要求高的应用场合。

1.1.2.2 电磁储能

电磁储能常见的储能方式为超导储能。超导储能系统是利用超导线圈将电磁能直接储存起来, 需要时再将电磁能返回电网或其他负载的一种电力设施, 它是一种新型高效的蓄能技术。超导储能系统主要由大电感超导储能线圈 (图 1.8)、氦制冷器 (使线圈保持在临界温度以下) 和交-直流变流装置构成。当储存电能时, 将发电机组 (如风力发电机) 的交流电经过整流装置变为直流电, 激励超导线圈; 发电

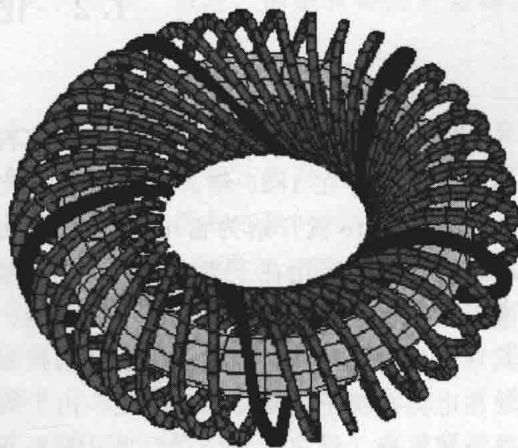


图 1.8 超导储能